

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

GUILHERME CLAMER TELES

**AFERIÇÃO DOS VALORES DOS COMPRIMENTOS EQUIVALENTES
UTILIZADOS NA DETERMINAÇÃO DA PERDA DE CARGA LOCALIZADA**

**Alegrete
2014**

GUILHERME CLAMER TELES

**AFERIÇÃO DOS VALORES DOS COMPRIMENTOS EQUIVALENTES
UTILIZADOS NA DETERMINAÇÃO DA PERDA DE CARGA LOCALIZADA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
da Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título
de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Fátima Cibele
Soares

**Alegrete
2014**

GUILHERME CLAMER TELES

**AFERIÇÃO DOS VALORES DOS COMPRIMENTOS EQUIVALENTES
UTILIZADOS NA DETERMINAÇÃO DA PERDA DE CARGA LOCALIZADA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil
da Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título
de Bacharel em Engenharia Civil.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 11 de março de 2014.

Banca examinadora:

Prof^a. Dr^a. Fátima Cibele Soares
Orientadora
Engenharia Agrícola - UNIPAMPA

Prof^a. Dr^a. Adriana Gindri Salbego
Engenharia Civil - UNIPAMPA

Prof^a. Dr^a. Eracilda Fontanela
Engenharia Agrícola - UNIPAMPA

Dedico este trabalho a minha família,
Edenilson, Sonia e Alyssara pelo apoio
incondicional durante toda essa jornada.
Muito obrigado!

AGRADECIMENTO

A Deus que sempre me deu forças para jamais desistir e encarar as adversidades de frente.

A Prof^a. Dr^a. Fátima Cibebe pela orientação, pelos ótimos conselhos e pelos conhecimentos transmitidos a mim durante a realização desse trabalho.

Aos meus pais Edenilson e Sonia pelo amor demonstrado durante toda essa caminhada e também pelas horas de conforto e incentivo, para que jamais deixasse que as adversidades superassem a vontade de vencer. Amo vocês.

A minha irmã Alyssara pelas palavras de incentivo nas horas que mais precisei.

Aos meus avós maternos e paternos, pela educação transmitida a mim. Em especial a minha vó Sueli, cuja qual, considero como uma mãe. Fiquem com Deus!

A todos os amigos que participaram junto comigo dessa caminhada, e fizeram de Alegrete um lugar melhor para se viver. Em especial ao amigo Rafael, que esteve junto comigo na maioria do tempo, compartilhando momentos bons e também ruins.

Aos técnicos de laboratório Cleber e Gilberto por terem me auxiliado na realização desse trabalho.

Muito Obrigado a todos!

“Sonha e serás livre de espírito, luta e serás livre na vida”.

Ernesto “Che” Guevara

RESUMO

Instalações hidráulicas prediais são de grande importância para o ser humano. É graças a esses sistemas que conseguimos transportar água de um local a outro, suprimindo a necessidade de água do homem, por isso os mesmos devem sempre estar bem dimensionados. Em um correto dimensionamento diversos fatores devem ser considerados, entre eles está a perda de carga, que é dividida em distribuída e localizada. O objetivo desse trabalho foi comparar os resultados das perdas de carga localizadas, em tubulações de PVC, geradas pelas peças especiais com as obtidas em tubulações com comprimento equivalente à peça. O experimento foi conduzido no laboratório de hidráulica da Universidade Federal do Pampa/Campus Alegrete, em uma bancada de tubulações, com diâmetros de 20, 25 e 32 mm, onde foi medida a perda de carga nas seguintes peças especiais: curva de 90°; cotovelo de 45° e 90° e registro de esfera. Para cada peça, foi obtida a perda de carga gerada pelos seus comprimentos equivalentes, através do produto da perda de carga linear, determinada experimentalmente em cada diâmetro estudado, pelo seu respectivo valor de comprimento equivalente. Os valores de comprimentos equivalentes usados foram obtidos na NBR 5626 (1998), para a curva de 90°, cotovelo de 45° e 90°; e na Schneider Motobombas (2014), para o registro de esfera. Também, compararam-se os valores de perda de carga distribuída, gerada em cada diâmetro de tubulação, com as estimadas pelas fórmulas Universal e de Fair-Whipple-Hsiao. Os valores de perda de carga gerados pelas singularidades foram comparados, com as perdas geradas pelos seus respectivos comprimentos equivalentes, através do teste de student a 5% de probabilidade de erro. Através dos resultados, observa-se que os valores de perda de carga, gerados pelos comprimentos equivalentes da curva de 90°, cotovelo de 45° e 90° são maiores, com diferença significativa, que os obtidos experimentalmente, exceto para a curva de 90° no diâmetro de 32 mm, onde a perda estimada é maior, porém sem significância. Já o registro de esfera apresentou perda de carga experimental superior que os valores tabelados, com diferença significativa. As perdas de carga distribuídas, medidas, foram maiores para as tubulações de diâmetros superiores, o mesmo se observou para as perdas estimadas pelas fórmulas. Conclui-se que os comprimentos equivalentes, hoje utilizados nos projetos hidráulicos estão superdimensionados, para curva de 90° (diâmetro de 20 e 25 mm), cotovelo de 45° e 90° (diâmetros de 20, 25 e 32 mm), no entanto, estão subdimensionados para o registro de esfera (diâmetros de 20, 25 e 32 mm), sendo assim, necessário o ajuste deste comprimento equivalente.

Palavras – Chave: Instalações hidráulicas prediais; Perda de carga localizada; Comprimentos equivalentes.

ABSTRACT

Building hydraulic installations are the most important in the everyday of the human. It is thank for this systems that we could transpose water from one place to another, supplying the necessary the water that the human has, for this the same must always to be good dimensioned. In the correct dimensioning many factors must to be considered, between them is the head loss, that is divided in distributed and located. The objective this work was compare the results of head losses located, in the pipes of PVC, generated for special parts with the obtained in pipes with equivalent length to the part. The experiment was made in hydraulics laboratory of the Federal University of the Pampa/Campus Alegrete, on a bench pipes, with diameters of 20, 25 and 32 mm, where were tested the many special parts: curve of 90°, elbow of 45° and 90°, sphere register. For each part, was obtained the head loss generated for their equivalent length, through of product of linear head loss, determined experimentally in each diameter studied, for the respective value of equivalent length. The values of equivalents length used were obtained in the NBR 5626 (1998), to curve of 90°, elbow of 45° and 90°; and in Schneider pumps (2014), to sphere register. Also, were compared the values of distributed head loss, generated in each diameter of pipes, with the estimated for the formulas Universal and the Fair-Whipple-Hsiao. The values of head losses generated for the singularities were compared, with the head losses generated for the their respective equivalents length, through of the student test the 5% of probability of wrong. Through of results, was observed that the values of head losses, generated for equivalents length of curve of 90°, elbow of 45° and 90° are bigger, with significant difference, that the obtained experimentally, except to curve of 90° of 32 mm, where the head loss estimated is bigger, however without significance. Ready the sphere register presented head loss experimentally superior that the tabulated values, with significant difference. The distributed head losses, measures, were bigger to the superiors pipes, the same observed to the head losses estimated for the formulas. Conclude that the equivalents length, today used in the hydraulics projects are oversized, to curve of 90° (diameter of 20 and 25 mm), elbow of 45° and 90° (diameters of 20, 25 and 32 mm), however, are undersized to the sphere register (diameters of 20, 25 and 32 mm), thus, necessary the adjustment of this equivalent length.

Keywords: Building Hydraulic installations; Localized head loss; Equivalent length.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação dos tipos de escoamento	16
Figura 2 – Experimento de Reynolds	17
Figura 3 – Fluxo permanente e o transitório.....	19
Figura 4 – Esquema para dedução da fórmula de Bernoulli	21
Figura 5 – Escoamento forçado e livre.....	23
Figura 6 – Perda de carga.....	24
Figura 7 – Diagrama de Moody	27
Figura 8 – Bancada experimental.....	32
Figura 9 – Ilustração das peças especiais	33
Figura 10 – Ilustração das tubulações retilíneas	34
Figura 11 – Ilustração do experimento para perda de carga distribuída	35
Figura 12 – Ilustração da bancada experimental para peças especiais	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores aproximados de K	29
Tabela 2 – Comprimentos equivalentes para tubos lisos (de plástico, cobre ou liga de cobre).....	31
Tabela 3 – Comprimentos equivalentes para tubos lisos (de PVC).	34
Tabela 4 – Perda de carga distribuída em tubulações retilíneas.....	40
Tabela 5 – Valores médios, de dez repetições, para perda de carga localizada obtidas experimentalmente e estimadas por seus respectivos comprimentos equivalentes.	41
Tabela 6– Perda de carga linear em 1m de tubulação, comprimentos equivalentes tabelados, para as respectivas peças e diâmetros e novos comprimentos equivalentes propostos..	43
Tabela 7 – Valores experimentais e teóricos, obtidos pelas fórmulas Universal e de Fair-Whipple-Hsiao, para a perda de carga distribuída, nos diferentes diâmetros estudados.....	44

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Objetivo geral	13
1.2	Objetivos específicos	13
1.3	Organização do trabalho	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1	Hidrodinâmica	15
2.1.1	Tipos e regimes de escoamentos	16
2.1.2	Equação da continuidade	20
2.1.3	Teorema de Bernoulli	21
2.2	Escoamento em tubulações	22
2.2.1	Perda de carga	23
2.2.2	Perda de carga distribuída	25
2.2.3	Perda de carga localizada	28
2.2.4	Método dos comprimentos virtuais	30
3	METODOLOGIA	32
3.1	Instalações e equipamentos	32
3.2	Medição da perda de carga distribuída	34
3.3	Medição da perda de carga localizada	37
3.4	Comparações das perdas de carga	38
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	40
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	45
	REFERÊNCIAS	46

1 INTRODUÇÃO

Desde a antiguidade, o ser humano tenta suprir a necessidade de abastecimento de água através de obras de engenharia. As instalações prediais são um exemplo disso. Com base nas normas vigentes e na prática da boa engenharia, essas obras devem estar de acordo com os critérios técnicos a fim de que possam atingir seu principal objetivo: atender a demanda com qualidade e conforto.

Desta forma, é relevante a consideração de alguns fatores primordiais para o bom funcionamento dessas obras. Caso forem desconsiderados, influenciarão drasticamente no correto dimensionamento da tubulação. O principal fator é denominado perda de carga, que consiste na dissipação de energia em forma de calor, devido ao atrito entre as partículas do fluido e, também, entre o contato dessas com a parede da tubulação. Esse fenômeno pode ser classificado como distribuído ou localizado.

A perda de carga distribuída ocorre ao longo da tubulação, enquanto que a localizada acontece devido à presença de diversas peças especiais existentes em um sistema de instalação hidráulica predial.

Estudos científicos demonstram a importância da análise das perdas de carga, para o sucesso dos projetos hidráulicos. Segundo Azevedo Netto (1998), quando o número de peças especiais em uma instalação hidráulica for muito elevado e a velocidade da água for superior a 1 m/s as perdas de carga devido a presença dessas singularidades podem chegar até 90% da perda de carga total, que é o caso das instalações em banheiros, onde observa-se pequenos trechos de tubulações retílineas e grande número de peças especiais.

Alguns pesquisadores recomendam a majoração das perdas de carga contínuas de 30% a 50% a fim de se levar em conta as perdas localizadas e outras incertezas. No entanto, essa recomendação não se aplica a todos os projetos hidráulicos, ficando a cargo do projetista esta “sensibilidade”. É devido a essa falta de percepção que há um grande número de projetos de instalações hidráulicas prediais mal dimensionados, com deficiência no abastecimento de água.

Seguindo a recomendação da NBR 5626 – Instalação predial de água fria (1998), o cálculo da perda de carga distribuída deve ser realizada através da fórmula Universal (1850) e/ou de Fair-Whipple-Hsiao (1930). Da mesma forma que as perdas

de cargas localizadas sejam consideradas através da tabela do método dos comprimentos equivalentes (1998).

As tabelas, com os comprimentos equivalentes para cada peça especial, podem ser utilizadas tanto para tubulações de cobre e liga de cobre como para tubulações de plástico, ambos com superfície lisa. Tanto essas tabelas, quantos as fórmulas são datadas de muito tempo atrás e, no decorrer dos anos, as indústrias e as técnicas de fabricação de tubos tiveram grandes avanços tecnológicos, proporcionando melhorias nos revestimentos, conferindo maior homogeneidade à superfície interna, portanto favorecendo condições ao escoamento do fluido. Além disso, conseguiram produzir tubos com maior comprimento, diminuindo o uso de juntas, o que contribui para a diminuição das perdas de cargas, devido a mesma estar relacionada diretamente com a rugosidade da tubulação.

As perdas de carga geradas pelas peças especiais de tubulações de PVC, que existem no mercado, são as mesmas geradas pelos seus respectivos comprimentos equivalentes tabelados. Diante deste questionamento, foi apresentada está proposta de trabalho.

1.1 Objetivo geral

Comparar os resultados das perdas de carga, em tubulações de PVC, geradas pelas peças especiais com as obtidas em tubulações com comprimento equivalente à peça.

1.2 Objetivos específicos

- Medir em bancada experimental a perda de carga localizada gerada nas seguintes peças de PVC: curva de 90°; cotovelo de 45° e 90°, registro de esfera nos diâmetros de 20, 25 e 32 mm.
- Obter, experimentalmente, a perda de carga contínua gerada pelo comprimento equivalente da curva de 90°; cotovelo de 45°, cotovelo de 90° e registro de esfera nos diâmetros de 20, 25 e 32 mm.
- Comparar os resultados experimentais, observados de perda de carga localizada, nas diferentes peças especiais e diâmetros, com as geradas pelos seus comprimentos equivalentes.

- Comparar os resultados experimentais, observados de perda de carga contínua, com os valores estimados através da fórmula Universal e de Fair-Whipple-Hsiao.

1.3 Organização do trabalho

Na busca do alcance dos objetivos propostos, este trabalho apresenta-se dividido em cinco tópicos distintos. O primeiro contém a introdução em que apresenta a justificativa e a importância do trabalho, bem como os objetivos. O segundo consta da revisão bibliográfica para embasar a pesquisa, onde serão abordados tópicos com relação à hidrodinâmica e ao escoamento em tubulações. O terceiro apresenta a metodologia que foi utilizada para obter os valores experimentais. No quarto apresenta-se e discutem-se os resultados obtidos através dos experimentos. E por fim, apresentam-se as considerações finais deste trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Hidrodinâmica

A hidrodinâmica é um dos ramos mais antigos da física, sendo seus primeiros estudos realizados por Euler e Bernoulli, em meados do século XVIII, que utilizaram os princípios newtonianos de conservação do momento e da energia para explicar sistemas líquidos e gasosos. Apresenta grande importância para o ramo da engenharia, pois compreende desde projetos de elaboração de aeronaves, barcos, automóveis, ou seja, qualquer sistema que se desloque por meio de um fluido, bem como projetos que envolvam transporte de fluidos, como tubulações hidráulicas, gasodutos, oleodutos (VERTCHENKO; DICKMAN; FERREIRA, 2009).

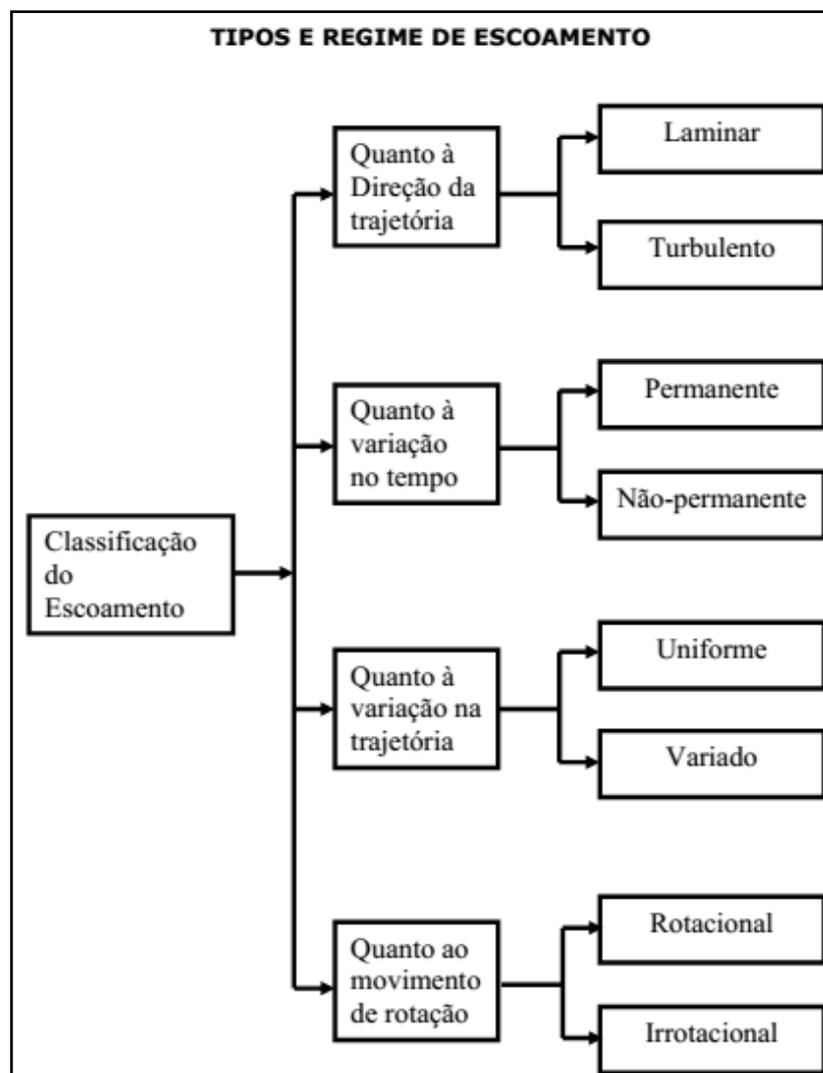
Em um sentido restrito, é o estudo do movimento de um fluido ideal, em que não apresenta coesão, viscosidade, elasticidade, e em alguns casos nem mesmo peso, podendo-se ser definida como a Mecânica Racional dos Fluidos (NEVES, 1979).

Levando-se em conta o movimento de um fluido perfeito em um sistema de eixos retangulares Ox , Oy , Oz , o deslocamento do mesmo ficará perfeitamente conhecido, considerando que em qualquer instante t , será conhecida a grandeza e a direção da velocidade v do fluido. Porém deve-se saber que o mesmo tem valores de pressão p e de massa específica ρ para cada posição levada em conta. Então, conclui-se que o problema relativo ao escoamento de fluidos ideais abrange 5 incógnitas v_x , v_y , v_z , p e ρ . Obviamente, sendo resolvidas por um sistema de 5 equações, que abrangem: as três equações gerais do movimento, relativas a cada uma das coordenadas dos eixos; a equação da continuidade, que exprime a lei da conservação de massas e uma equação complementar, que leva em conta a natureza do fluido. Há dois métodos para a resolução desse problema: o método de Lagrange, que consiste em acompanhar as partículas em movimento, ao longo das trajetórias, e o de Euler, que estuda a variação das grandezas mencionadas no decorrer do tempo e em determinado ponto. Sendo o último mais adotado, devido a sua simplicidade e comodidade comparado a de Lagrange. (AZEVEDO NETTO, 1998).

2.1.1 Tipos e regimes de escoamentos

Segundo Porto (2004), os escoamentos de fluidos estão sujeitos a determinadas condições gerais, princípios e leis da dinâmica e à teoria da turbulência. Sabendo-se disso, a hidráulica, de um modo geral, possui diversas maneiras de classificar os fluidos de acordo com as suas características, a Figura 1, ilustra como os escoamentos podem ser divididos:

Figura 1- Classificação dos tipos e regimes de escoamento



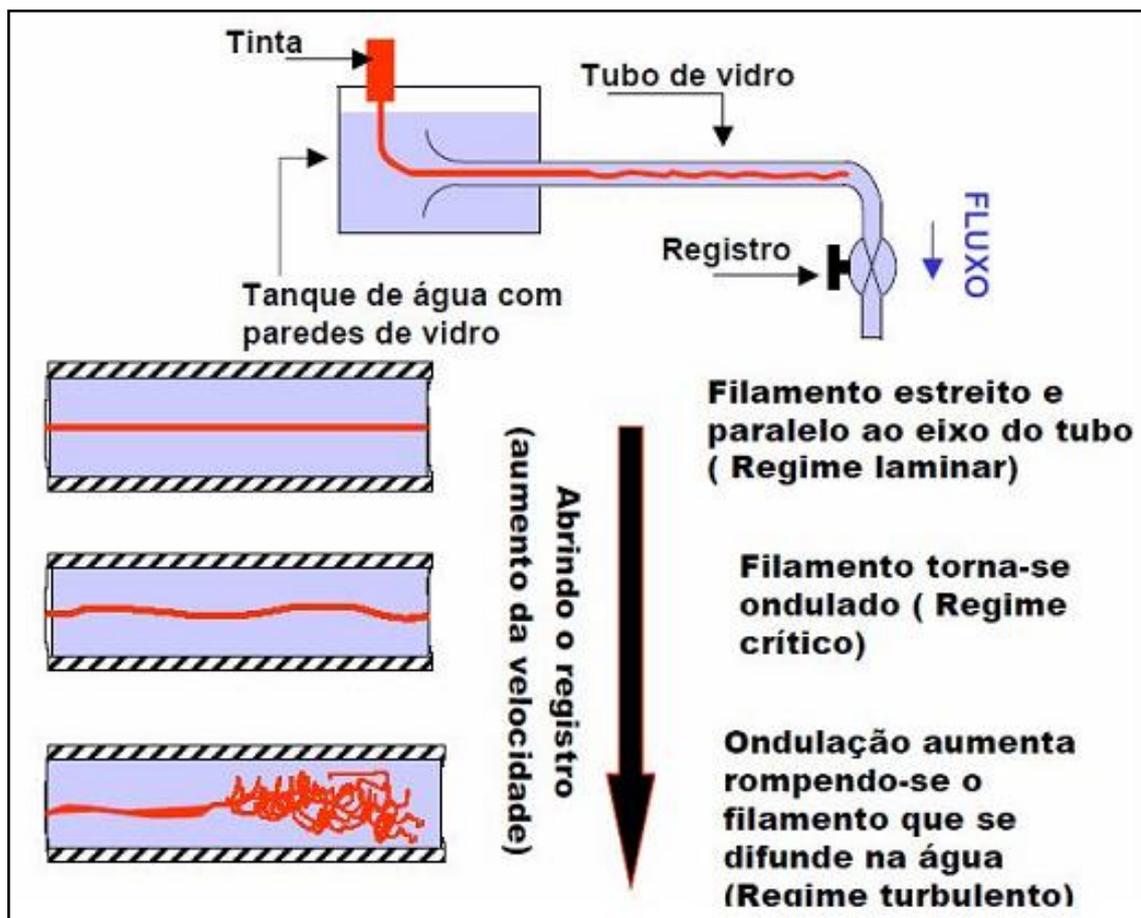
Fonte: Pordeus, 2009?, p.9

Azevedo Netto (1998), Porto (2004) e Baptista (2010), afirmam que o escoamento de um fluido pode ser classificado quanto à direção na trajetória das suas partículas, em movimento laminar ou turbulento.

Essa classificação foi proposta e demonstrada por Osborne Reynolds, em 1883, que realizou um experimento que consistia na injeção constante de um corante, em um determinado ponto de uma tubulação de vidro, que conduzia água para um ponto distante.

O sistema era constituído de uma válvula, que possibilitava a alteração da vazão. A partir dessa variação de descarga, ele notou que quanto menor a perturbação das camadas do líquido, mais retilíneo e coeso era o filamento de corante, denominando-se regime laminar. E quanto mais agitadas as partículas do líquido estavam, mais dissolvido o filete ficava, denominando-se regime turbulento (BAPTISTA, 2010). A Figura 2 demonstra o experimento realizado por Reynolds.

Figura 2 - Experimento de Reynolds



Fonte: Evangelista, 2011?, p.2

Segundo Baptista (2010), considerando as indicações de Reynolds, obtêm-se:

$$Re = \frac{\rho U D_h}{\mu} \quad \dots(1)$$

Ou

$$Re = \frac{UD_h}{\nu} \quad \dots(2)$$

Em que:

Re: Números de Reynolds;

U: Velocidade média de escoamento (m/s);

Dh: Dimensão geométrica característica (m);

ρ : Massa específica (kg/m³);

μ : Viscosidade dinâmica (kg/m.s);

ν : Viscosidade cinemática (m²/s).

Em escoamentos livres, será adotado raio hidráulico (Rh) como dimensão geométrica característica, e para condutos forçados o diâmetro (D).

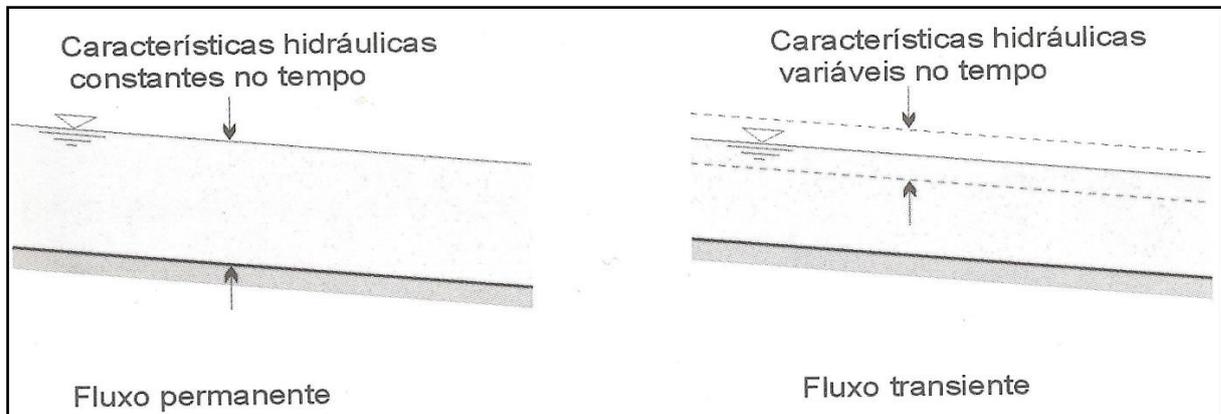
Para condutos livres verifica-se que o regime laminar caracteriza-se por possuir um Re inferior a 500, enquanto o turbulento verifica-se acima de 1000, e o intervalo existente entre esses dois, denomina-se regime de transição. Já para condutos forçados, que é foco de estudo desse trabalho, o regime laminar constata-se a um Re menor que 2000 enquanto que o regime turbulento encontra-se para um Re superior a 4000, estando o regime transitório localizado entre esses dois limites (BAPTISTA, 2010).

Como na maioria dos problemas de engenharia hidráulica, o principal fluido utilizado é a água, cuja viscosidade é relativamente baixa e o regime predominante turbulento, com suas partículas movendo-se em trajetórias irregulares, e movimentos aleatórios (PORTO, 2004).

Os escoamentos ainda podem ser classificados quanto à variação no tempo, em permanentes e transitórios. No primeiro caso, as características do escoamento não variam com o tempo, ou seja, a velocidade, a massa específica, a pressão. mantêm-se constante, em oposição ao que ocorre no regime transitório. Este ainda pode ser subdividido conforme a taxa de variação da velocidade e da pressão. Se estas características variam pouco a pouco, a mudança é lenta e a compressibilidade do líquido não é considerável, como é o caso de uma tubulação abastecida por um reservatório. Ao contrário de quando a mudança ocorre bruscamente, como no fechamento de válvulas em condutos forçados, fazendo com que haja uma acentuada variação de pressão, dando origem ao fenômeno

conhecido como golpe de aríete, que deve ser evitado em instalações hidráulicas (BAPTISTA, 2010). A Figura 3 apresenta o fluxo permanente e o transitório.

Figura 3 - Fluxo permanente e o transitório



Fonte: Baptista, 2010, p.43

Levando-se em conta a trajetória, os escoamentos podem ser classificados em uniforme e variados. Conforme Baptista (2010, p.12) “No escoamento uniforme o vetor velocidade é constante em módulo, direção e sentido, em todos os pontos, para qualquer instante”, ficando matematicamente expresso da seguinte forma: $\partial v / \partial s = 0$, sendo v velocidade e s deslocamento. E para escoamento variado, $\partial v / \partial s \neq 0$, onde “os diversos pontos da mesma trajetória não apresentam velocidade constante no intervalo de tempo considerado” (PORDEUS, 2009?, p.12).

O escoamento uniforme pode ser verificado em adutoras e canais prismáticos em que a altura da lâmina é invariável, pois são tubulações de grandes extensões em que o diâmetro não varia. Ao contrário de tubulações que apresentam diversas seções e declividade variáveis, que caracterizam o escoamento variado.

Os escoamentos também podem ser classificados quanto a sua velocidade angular de suas partículas, sendo definidos como rotacionais e irrotacionais. Baptista (2010) apresenta como sendo um escoamento rotacional aquele que a velocidade da partícula difere de zero, enquanto para irrotacional, a velocidade é tida como zero. E cabe mencionar que Pordeus (2009?) afirma que devido à viscosidade, os fluidos reais sempre estão sujeitos ao escoamento rotacional, porém para simplificar os estudos da mecânica dos fluidos, usualmente caracteriza-os como escoamento irrotacional.

Existem ainda os escoamentos unidimensional, bidimensional e tridimensional. O escoamento unidimensional é aquele em que suas características (pressão, velocidade) são função de apenas uma coordenada espacial e do tempo. Enquanto o bidimensional, podem ser expressos por duas coordenadas, e o tridimensional por três, porém, neste caso, deve-se utilizar métodos matemáticos mais complexos para a sua resolução (PORTO, 2004).

Sabendo-se que líquidos ideais não encontram-se na natureza e na grande maioria, os escoamentos podem ser classificados como unidimensionais e em regime permanente, fazendo com que as equações da continuidade e de Bernoulli sejam apresentadas de uma forma mais simplificada. Algumas vezes, quando se possuem escoamentos bidimensionais e tridimensionais, as mesmas devem passar por alguns ajustes (BAPTISTA, 2010).

2.1.2 Equação da continuidade

De acordo com Baptista (2010), a equação da continuidade resulta da lei de conservação de massa, a qual expressa que a massa não pode ser criada ou destruída, ou seja, o volume de água que escoar através de duas seções, 1 e 2, de um conduto, será mantida do começo ao fim. Sendo expressa, na seguinte forma:

$$\rho_1 A_1 U_1 = \rho_2 A_2 U_2 \quad \dots(3)$$

Sabendo-se que o fluido estudado pela hidráulica é a água, em que é tratado como sendo incompressível, e tendo uma massa específica que pode ser considerada constante no regime permanente, a fórmula fica representada:

$$A_1 U_1 = A_2 U_2 = Q \quad \dots(4)$$

Em que:

A: área da seção transversal do escoamento (m²);

U: velocidade média do escoamento (m/s);

Q: vazão (m³/s).

2.1.3 Teorema de Bernoulli

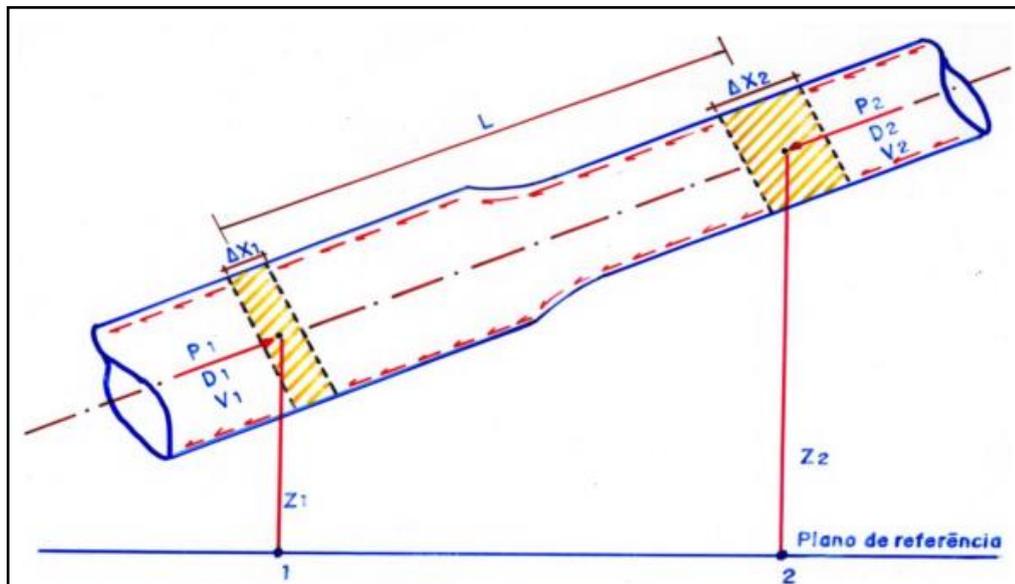
O princípio de Bernoulli ou teorema de Bernoulli deriva da aplicação da equação de Euler aos fluidos (líquidos), em movimento permanente. Este teorema expressa o princípio da conservação de energia para os fluidos. A variação total de energia de um sistema qualquer é a soma da variação de energia potencial, da variação da energia cinética e da variação devido ao trabalho realizado pela pressão.

Por isso o teorema de Bernoulli pode ser enunciado como “Ao longo de qualquer linha de corrente é constante a soma das alturas cinéticas ($V^2/2g$), piezométrica (p/γ) e geométrica (Z)” (AZEVEDO NETO, 1998, p.54). Sendo expressa matematicamente da seguinte forma:

$$\Delta E = \Delta E_p + \Delta E_c + \Delta T_p \quad \dots(5)$$

Sabendo-se que a energia potencial pode ser obtida através de $\Delta E_p = mg(z_1 - z_2)$, a energia cinética por $\Delta E_c = 0,5m(V_1^2 - V_2^2)$ e a variação no trabalho das pressões pode ser expressa por $\Delta T_p = mg(\frac{p_1}{\gamma} - \frac{p_2}{\gamma})$. A equação de Bernoulli pode ser deduzida através do esquema demonstrado na Figura 4.

Figura 4 - Esquema para dedução da fórmula de Bernoulli



Fonte: Torres, 2011, p.12

A variação da energia total por unidade de peso é obtida por $\Delta e = \frac{\Delta E}{mg}$,

fazendo as reagrupações necessárias, temos:

$$\frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} + z_1 = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \Delta e \quad \dots(6)$$

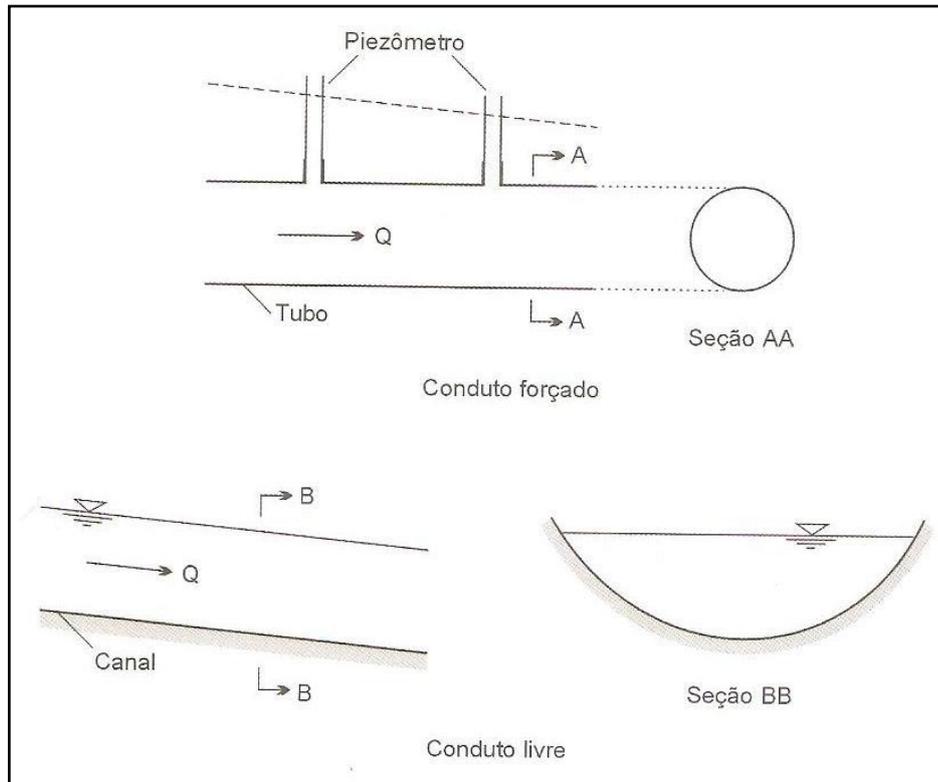
A equação da continuidade e o teorema de Bernoulli foram desenvolvidos para líquidos ideais, ou seja, fluido incompressível e invíscido (viscosidade nula), no entanto, essa condição não é encontrada na natureza. Sempre que o fluido, água, se movimenta do ponto 1 à 2 (Figura 4) ocorre uma perda de energia ao longo deste percurso, denominada perda de carga.

Deste modo, conforme se observa na equação 6, a energia total ao final do sistema, nada mais é do que a energia total inicial do mesmo, acrescido de uma perda de carga (Δe).

2.2 Escoamento em tubulações

O escoamento pode ser classificado como forçado ou livre (Figura 5), quando se diz respeito à pressão reinante no conduto. Na primeira circunstância a pressão é diferente da atmosférica, assim o conduto deve ser fechado, funcionando sempre totalmente cheio, por exemplo, o que ocorre em encanamentos prediais ou de recalques e sucção das bombas. Em condutos livres a pressão em qualquer ponto na superfície do líquido é igual à atmosférica, podendo ou não o mesmo ser aberto, como em canais fluviais, ou nas redes de coleta de esgoto sanitário (BAPTISTA, 2010).

Figura 5 - Escoamento forçado e livre



Fonte: Baptista, 2010, p.43

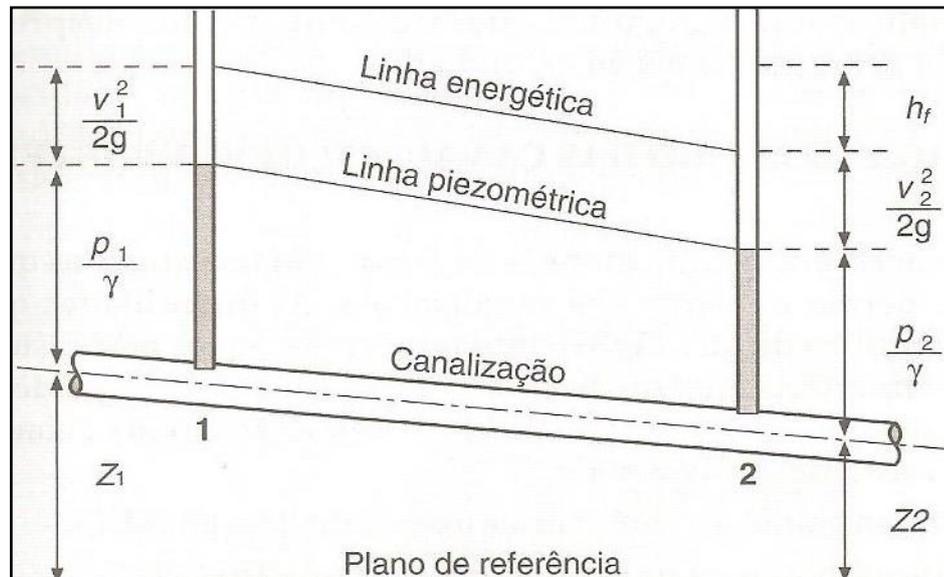
A maioria das obras de engenharia são classificadas como condutos forçados, e nesses tipos de sistemas há uma variável, denominada perda de carga, que deve ser levada em conta para o correto dimensionamento de sistemas de bombeamento e tubulações. O fluido que escoar nesses sistemas está sujeito a forças resistentes, que podem ser geradas pelas paredes dos tubos e/ou por uma região do próprio líquido, chamada de camada limite. Deste modo, surgem forças de cisalhamento que fazem com que a capacidade de fluidez deste diminua, existindo uma perda de calor durante o seu escoamento, o que também pode ser denominado de perda de carga Δe (MAUREN ELL; TRABACHINI, 2009).

2.2.1 Perda de carga

Desde os primórdios o homem utiliza condutos, tanto livre como forçado para transportar água de um lugar ao outro, sempre visando realizar esse transporte da melhor maneira possível, ou seja, sem que haja uma perda de energia ao fim desse sistema. Porém isso não é possível, pois quando um líquido flui de um ponto ao outro em uma tubulação, há uma dissipação da energia inicial, sob a forma de calor.

A soma do teorema de Bernoulli no final do trecho não se iguala a carga inicial, essa diferença h_f (Figura 6), é denominada perda de carga, considerada de suma importância nos problemas de engenharia, sendo motivo de muitas investigações (AZEVEDO NETTO, 1998).

Figura 6 - Perda de carga



Fonte: Azevedo Netto, 1998, p.115

Perda de carga também pode ser interpretada como sendo parte da energia potencial, de pressão e de velocidade que é convertida em outros tipos de energia, tal como calor, no decorrer do transporte do líquido. Quanto maior a rugosidade, maior será a turbulência do escoamento e assim, maior será a perda de carga (STREETER; WYLIE, 1980, apud VILAÇA, 2012).

Azevedo Netto (1998) segue na mesma linha, dizendo que a perda de carga imprime uma resistência ao escoamento sendo resultante fundamentalmente à viscosidade do fluido e à inércia das partículas. Sendo variável conforme o grau de rugosidade da parede do tubo e com a velocidade da água. Esses fatores fazem com que haja diferentes tipos de perda de carga, distinguindo-se de acordo com o determinado tipo de regime. Para o regime laminar ela deve-se inteiramente à viscosidade, enquanto que para o regime turbulento é devida à viscosidade e à inércia.

Para os problemas de engenharia o fluido na maioria das vezes encontra-se no regime turbulento, pois as tubulações não são compostas apenas por partes retilíneas e de mesmo diâmetro. Sendo que ainda há a necessidade de serem

compostas por peças especiais, que causam o aumento da turbulência, pois fazem com que o fluxo do fluido seja mudado repentinamente, como é o caso de curvas e cotovelos (AZEVEDO NETTO, 1998).

Sampaio (2007) analisa a perda de carga em tubos de aço zincado, ferro galvanizado e PVC, com diferentes diâmetros, em águas residuais oriundas da suinocultura. Os resultados demonstraram que a perda de carga possui comportamento linear em função da concentração de sólidos totais da água. Os estudos também mostraram que as perdas de carga determinadas a partir dos fatores de correção parcial e global apresentaram superestimativa e subestimativa média de 0,7% e 13%, respectivamente.

Outro exemplo da importância do estudo de perda de carga é demonstrado no artigo de Marcolin e Robaina (2002). O trabalho analisa o consumo de energia e a eficiência das estações de bombeamento de lavouras de arroz irrigado. Os resultados mostram que 67% das bombas funcionavam com rendimentos abaixo de 75%, em consequência à grande perda de carga no sistema, entre outros fatores. Também constatou-se que adequando-se às estações de bombeamento, é possível economizar 29% da energia elétrica com a redução das perdas de carga em 41%.

Outro trabalho que expõe a importância de perda de carga é mostrado na pesquisa realizada por Resende (2007), onde a infestação de um molusco *Limnoperna fortunei* provoca grandes perdas de carga de tubulações de usinas hidrelétricas em consequência da perda de seção útil dos tubos.

As perdas de carga podem ser classificadas como contínua ou localizada. A perda de carga contínua ocorre em consequência do atrito externo do líquido com as paredes da tubulação e também pelo atrito interno entre as partículas do mesmo. Enquanto a perda de carga localizada acontece devido ao aumento da turbulência na região da peça especial (BACK, 2006).

A perda de carga distribuída ou contínua ocorre em trechos retilíneos da tubulação, ao contrário da perda de carga localizada que ocorre em trechos curvos, em peças ou dispositivos especiais.

2.2.2 Perda de carga distribuída

Para a determinação da perda de carga distribuída já foram desenvolvidos vários métodos, porém o que ainda melhor se aplica é a equação de Darcy-

Weisbach ou “fórmula Universal”. Resulta de estudos relacionados com a tensão da água nas paredes da tubulação. Foi deduzida conforme as leis de similaridade, que está diretamente ligada com a análise dimensional, por isso é considerada teórica (VON BERNUTH, 1990, *apud* ZITTERELL, 2011).

Essa equação envolve todas as variáveis responsáveis pelo fenômeno da perda de carga distribuída, por isso vários autores argumentam que é a mais adequada. A NBR 5626 (ABNT, 1998), que é norma que regulamenta as instalações hidráulicas prediais de água fria no Brasil, recomenda que o cálculo seja feito por essa fórmula. Azevedo Netto (1998), depois de fazer algumas considerações apresenta a forma final da equação, da seguinte forma:

$$hf = 0,0826 f \frac{Q^2}{D^5} L \quad \dots(7)$$

Em que:

hf: perda de carga contínua (m);

f: fator de atrito (adimensional);

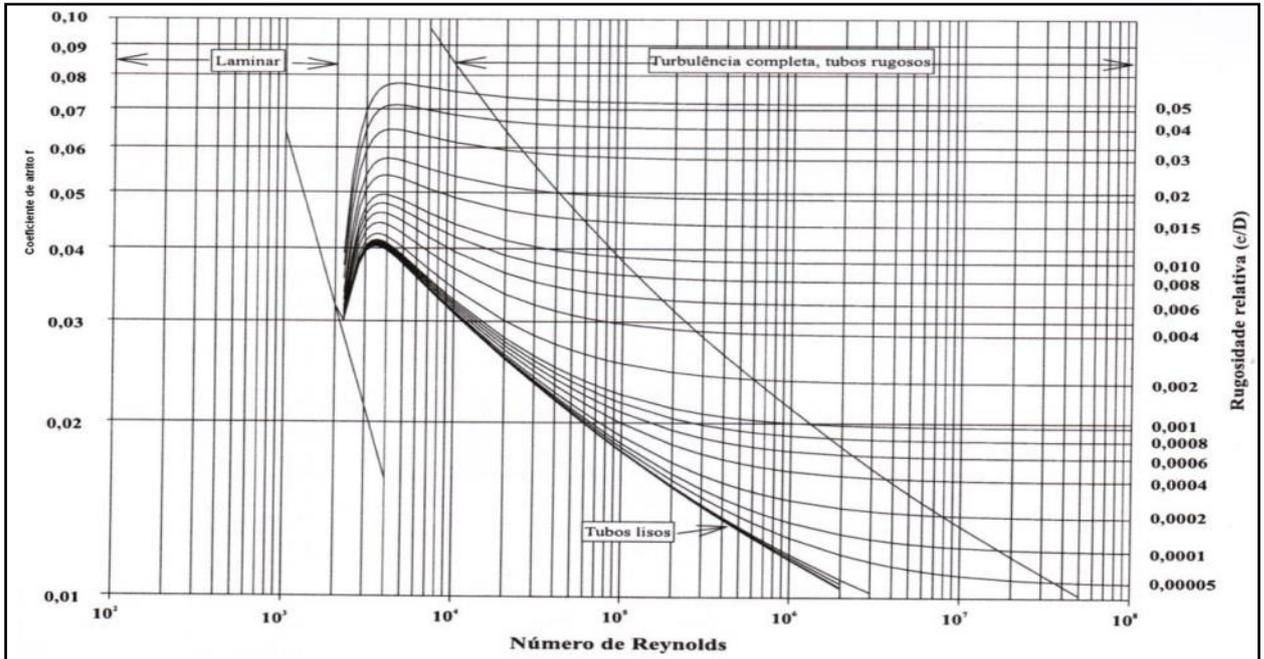
L: comprimento da tubulação (m);

D: diâmetro da tubulação (m);

Q: vazão (m³/s);

O fator de atrito pode ser obtido, de diferentes maneiras, uma delas é por meio de um gráfico, conhecido como Diagrama de Moody (Figura 7).

Figura 7 - Diagrama de Moody



Fonte: Torres, 2011, p.16

O fator de atrito (f) também pode ser obtido através de expressões matemáticas. Dentre estas, tem-se proposta por Swamee e Jain (equação 8) e a desenvolvida por Barr (equação 9) (BAPTISTA, 2010).

$$f = \frac{1,325}{\left[\ln\left(\frac{e}{3,7D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}}\right) \right]^2} \quad \dots(8)$$

Válida para $5 \times 10^3 \leq Re \leq 10^8$ e $10^{-6} \leq e/D \leq 10^{-2}$.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log\left(\frac{e}{3,7D} + \frac{5,13}{Re^{0,89}}\right) \quad \dots(9)$$

Válida para $Re > 10^5$.

Em que:

f : fator de atrito (adimensional);

D : diâmetro da tubulação (m);

e : é a rugosidade absoluta da tubulação (m);

Re : número de Reynolds, obtido através da fórmula 1 e 2;

ν : viscosidade cinemática, cujo valor médio para água é $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ a 20°C .

Entre outros métodos conhecidos para se determinar a perda de carga contínua ou distribuída, está a fórmula de Fair-Whipple-Hsiao, a qual, também é recomendada pela norma NBR 5626 (1998), para os projetos de instalações hidráulicas prediais de água fria (BAPTISTA, 2010). No entanto, o uso da mesma não pode ser de forma indiscriminada.

- Para tubos de aço galvanizado e ferro fundido:

$$J = 0,002021 \frac{Q^{1,88}}{D^{4,88}} \quad \dots(10)$$

- Para tubos de cobre ou plástico:

$$J = 0,000859 \frac{Q^{1,75}}{D^{4,75}} \quad \dots(11)$$

Em que:

J: perda de carga (m);

Q: vazão da tubulação (m³/s);

D: diâmetro da tubulação (m).

2.2.3 Perda de carga localizada

Nas instalações hidráulicas prediais o número de peças especiais é muito grande, uma vez, que para se conseguir transportar água de um ponto para outro é necessário que a tubulação sofra várias mudanças na sua direção, sendo necessária a utilização dessas peças. Portanto “a perda de carga localizada é mais importante do que a perda de carga contínua, devido ao grande número de conexões e aparelhos, relativamente ao comprimento de tubulação” (BAPTISTA, 2010, p.78).

Cada peça especial (curva de 90°, cotovelo de 45° e 90° entre outras) constitui uma singularidade do circuito, que causa localmente no escoamento um acréscimo de turbulência, que por sua vez leva a um aumento de dissipação de energia, fazendo surgir uma perda de carga localizada.

Azevedo Netto (1998) sugere como metodologias para dimensionamento destas perdas de carga, duas alternativas: i - expressão geral; ii - método do comprimentos equivalentes. A expressão geral para as perdas de cargas localizadas, é expressa pela equação 12:

$$hf = k \frac{v^2}{2g} \quad \dots(12)$$

Em que:

v: é a velocidade numa seção considerada de referência (m/s);

K: é um coeficiente, tabelado, que depende da geometria da singularidade, do número de Reynolds e, em alguns casos, das determinadas condições do escoamento.

Em situações práticas, o movimento de água em tubulações é sempre turbulento e, conforme Azevedo Netto (1998), o valor de K pode ser considerado constante para peças especiais utilizadas nas instalações hidráulicas, caso o regime seja turbulento, indiferente da velocidade, do diâmetro da tubulação e do tipo do fluido. A Tabela 1 expõem valores aproximados de K para peças mais comuns utilizadas em projetos de dimensionamento hidráulico predial.

Tabela 1 - Valores aproximados de K

Peça	K	Peça	K
Ampliação gradual	0,30*	Junção	0,40
Bocais	2,75	Medidor de Venturi	2,50**
Comporta aberta	1,00	Redução gradual	0,15
Controlador de vazão	2,50	Saída de tubulação	1,00
Cotovelo de 90°	0,90	Tê, passagem direta	0,60
Cotovelo de 45°	0,40	Tê, saída de lado	1,30
Crivo	0,75	Tê, saída bilateral	1,80
Curva de 90°	0,40	Válvula de ângulo aberta	5,00
Curva de 45°	0,20	Válvula de gaveta aberta	0,20
Curva de 22,5°	0,10	Válvula borboleta aberta	0,30
Entrada normal	0,50	Valvula de pé	1,75
Entrada de borda	1,00	Válvula de retenção	2,50
Existência de pequena derivação	0,03	Válvula de globo aberta	10,00
*com base na velocidade maior (seção menor)		Velocidade	1,00
**Relativa a velocidade na tubulação			

Fonte: Azevedo Netto, 1998, p.122

2.2.4 Método dos comprimentos equivalentes

Este método consiste, para efeito de cálculo somente, na substituição das peças especiais de uma tubulação, por um trecho retilíneo, de igual diâmetro, que provoque a mesma perda de carga que a do acessório. Dessa forma cada comprimento equivalente (L_e) é adicionado ao comprimento real da tubulação, transformando todo o cálculo em um problema de perda de carga contínua ou distribuída (PORTO, 2004).

Apesar da sua simplicidade esse método é de fundamental importância para os cálculos das tubulações prediais, tanto é que a NBR 5626 (ABNT, 1998) cita que quando existir incertezas da quantidade de peças especiais, deve-se estimar uma porcentagem de até 40% do comprimento real da tubulação para se cobrir a perda de carga em todas as conexões.

Barrêto Junior (2006) efetuou um estudo de caso para um condomínio, em que avalia a otimização do dimensionamento da rede hidráulica através de método Granados e da maneira convencional, através da NBR 5626, utilizando o método dos comprimentos virtuais. Ao final da sua pesquisa, concluiu que a rede dimensionada segundo o método Granados apresenta uma economia de 12,39% de materiais, comparando-se à rede dimensionada convencionalmente.

Outro caso em que é utilizado o método dos comprimentos equivalentes para se dimensionar uma instalação hidráulica é verificado no estudo realizado por Baeta (2007), em que realizou análise e avaliação da prática atual de dimensionamento de redes prediais de distribuição de água com base em medições de vazão e pressão e na modelação matemática. Dentre as conclusões obtidas, recomenda-se a majoração das perdas de carga contínuas, em 30 a 50% para ter em conta as perdas localizadas e outras incertezas.

Outro exemplo da importância dos métodos dos comprimentos equivalentes é mostrada por Souza (2012), em que realiza o dimensionamento do sistema hidráulico de uma desensiladeira para uso agrícola, fazendo-se necessário o uso desse método para o correto dimensionamento.

Portanto, conclui-se que esse método é de fundamental importância para dimensionamento de diversos sistemas hidráulicos. A Tabela 2 mostra os comprimentos equivalentes para algumas peças especiais, utilizadas nas instalações hidráulicas prediais.

Tabela 2 - Comprimentos equivalentes para tubos lisos (de plástico, cobre ou liga de cobre)

Diâmetro nominal DN	Tipo de conexão					
	Cotovelo de 90°	Cotovelo de 45°	Curva de 90°	Curva de 45°	Tê passagem direta	Tê passagem lateral
15	1,1	0,4	0,4	0,2	0,7	2,3
20	1,2	0,5	0,5	0,3	0,8	2,4
25	1,5	0,7	0,6	0,4	0,9	3,1
32	2,0	1,0	0,7	0,5	1,5	4,6
40	3,2	1,0	1,2	0,6	2,2	7,3
50	3,4	1,3	1,3	0,7	2,3	7,6
65	3,7	1,7	1,4	0,8	2,4	7,8
80	3,9	1,8	1,5	0,9	2,5	8,0
100	4,3	1,9	1,6	1,0	2,6	8,3
125	4,9	2,4	1,9	1,1	3,3	10,0
150	5,4	2,6	2,1	1,2	3,8	11,1

Fonte: NBR 5626, 1998, p.30

3 METODOLOGIA

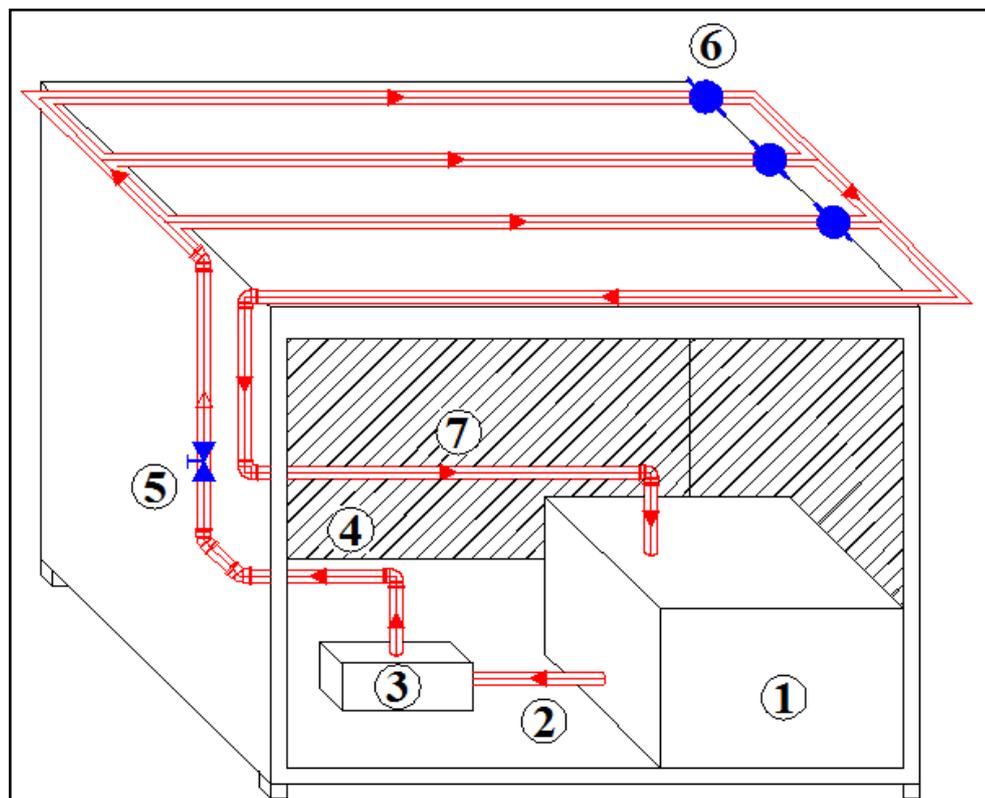
Neste capítulo serão apresentados os métodos e procedimentos adotados para o desenvolvimento do trabalho.

3.1 Instalações e equipamentos

O experimento foi realizado no laboratório de hidráulica da Universidade Federal do Pampa, Campus Alegrete, localizado na Avenida Tiarajú, 810, no Bairro Ibirapuitã, na cidade de Alegrete – RS.

Para a realização do experimento foi utilizada uma bancada que possui um sistema de bombeamento de água em circuito fechado. A mesma é composta por: reservatório (1), tubulação de sucção (2), moto-bomba (3), tubulação de recalque (4), registro de esfera (5), registros de gavetas (6), tubulação de refluxo (7) e tomadas de pressão para manômetro diferencial de mercúrio. A Figura 8 ilustra a bancada experimental utilizada.

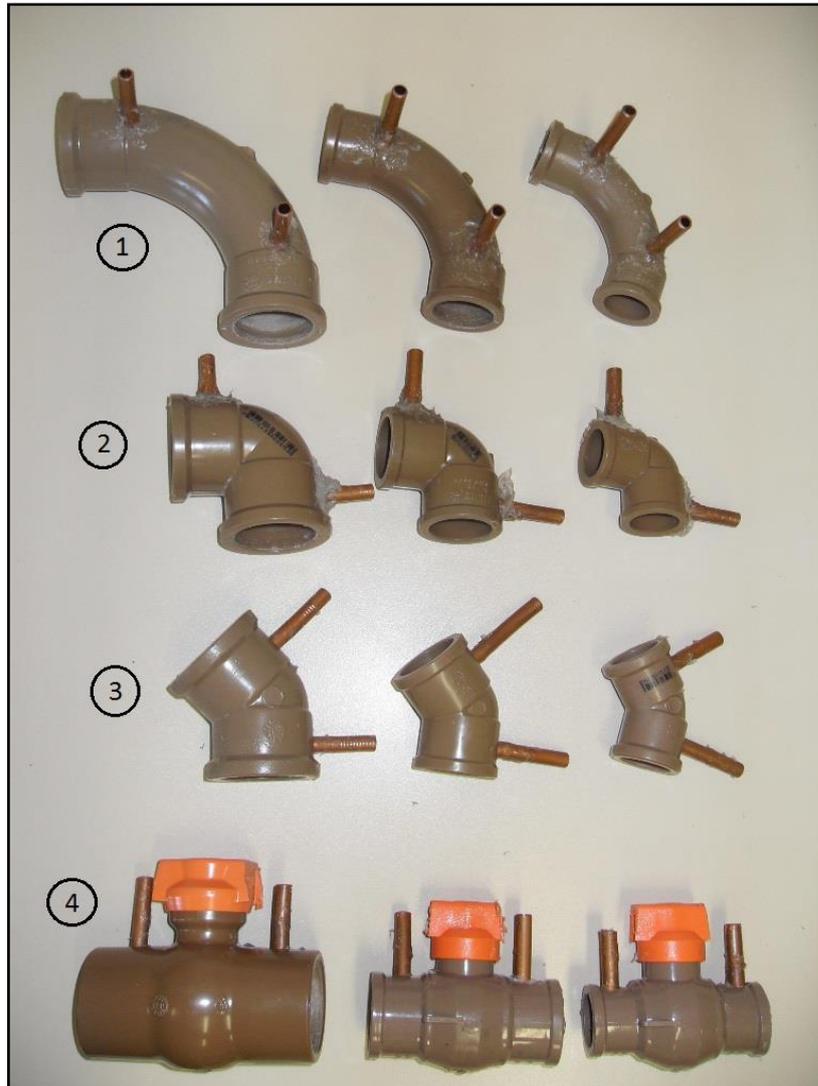
Figura 8 - Bancada experimental



Fonte: Elaboração própria

As peças especiais utilizadas para determinação da perda de carga foram as seguintes: curvas de 90°(1), cotovelos de 90° (2) e 45° (3), registro de esfera (4), representadas na Figura 9.

Figura 9 – Ilustração das peças especiais



Fonte: Elaboração própria

Os valores de perda de carga localizada medidos, experimentalmente, em cada peça, foram comparados com os valores de perda de carga gerados pelos seus respectivos comprimentos equivalentes. As perdas de carga geradas pelos comprimentos equivalentes, das diferentes peças e diâmetros, foram obtidas através, do produto da perda de carga medida, em 1m linear de tubulação, pelos referentes valores de seus comprimentos equivalentes, tabelados.

Foram adotados como comprimentos equivalentes para os cotovelos de 45° e 90, e curva de 90°, os valores disponíveis na NBR 5626 (1998), já para o registro de esfera utilizou-se o catálogo de perdas de carga em acessórios da Schneider Motobombas (2014). Esses valores encontram-se na Tabela 3.

Tabela 3 - Comprimentos equivalentes para tubos lisos (de PVC)

Diâmetro nominal DN	Tipo de conexão			
	Cotovelo de 45°	Cotovelo de 90°	Curva de 90°	Registro de esfera
20	0,5	1,2	0,5	0,2
25	0,7	1,5	0,6	0,3
32	1,0	2,0	0,7	0,4

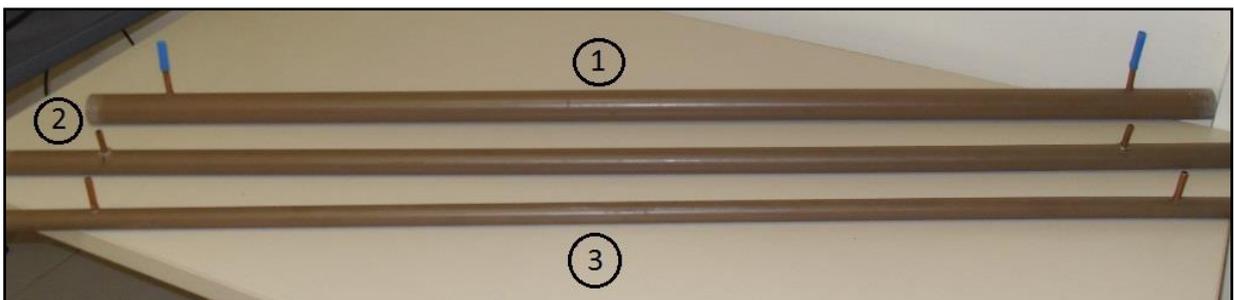
Fonte: Modificado de NBR 5626 (1998) e Schneider Motobombas (2014).

Na bancada experimental, as tubulações utilizadas para determinação das perdas de carga, geradas pelos comprimentos equivalentes, tiveram 1m de extensão, em material de PVC liso, com diâmetros de 20, 25 e 32 mm. No início e final de cada tubulação foram conectadas tomadas de pressão.

3.2 Medição da perda de carga distribuída

A primeira etapa do experimento consistiu em medir a perda de carga distribuída, para uma tubulação de 1 m, nos diâmetros de 20 (3), 25 (2) e 32 mm (1), mostrados na Figura 10, que são normalmente, os mais utilizados para as instalações hidráulicas prediais.

Figura 10 – Ilustração das tubulações retilíneas



Fonte: Elaboração própria

Esse processo foi realizado em bancada experimental (Figura 11). A passagem de água ocorreu em um circuito de cada vez, ou seja, quando se estava fazendo a medida de perda de carga no tubo de diâmetro de 20 mm, nas demais tubulações, paralelas, não estava circulando água.

Figura 11 – Ilustração do experimento para perda de carga distribuída



Fonte: Elaboração própria

Partindo-se do princípio formulado por Bernoulli, em que “Ao longo de qualquer linha de corrente é constante a soma das alturas cinéticas ($V^2/2g$), piezométrica (p/γ) e geométrica (Z)”, para líquidos perfeitos (AZEVEDO NETO, 1998, p.54). Entretanto, para líquidos reais, esta equação sofre uma alteração, uma vez que ao final do escoamento existirá uma perda de energia, denominada perda de carga (equação 13).

$$\frac{v1^2}{2g} + \frac{p1}{\gamma} + z1 = \frac{v2^2}{2g} + \frac{p2}{\gamma} + z2 + \Delta e \quad \dots(13)$$

A bancada estava em mesmo nível ($Z_1 = Z_2$) e a parcela que corresponde a energia cinética foi a mesma ($V_1^2/2g = V_2^2/2g$), uma vez que o diâmetro ao longo deste 1 m não foi alterado. Assim a equação 13 ficará reescrita da seguinte forma:

$$\Delta e = \frac{p_1}{\gamma} - \frac{p_2}{\gamma} \quad \dots(14)$$

Essa diferença de pressão foi obtida através de um manômetro diferencial de mercúrio. Este foi instalado com uma das tomadas de pressão ligada no início e a outra conectada no final do metro linear. Sendo que as tomadas de pressão estavam no mesmo nível, assim a diferença de pressão (Δp), em $N.m^{-2}$, pode ser expressa por:

$$\Delta p = (\gamma' - \gamma)h_2 \quad \dots(15)$$

Em que:

γ' = peso específico do mercúrio ($N.m^{-3}$);

γ = peso específico da água ($N.m^{-3}$);

h_2 = desnível da coluna de mercúrio (m).

Assim a perda de carga linear (Δe) em m.c.a será:

$$\Delta e = \Delta p \times 0,000102 \quad \dots(16)$$

Sabendo-se que perda de carga unitária é a razão da perda de carga total pelo comprimento total da tubulação, foi possível saber a perda de carga que cada comprimento equivalente gera.

A vazão foi mantida constante para os diferentes diâmetros estudados. A mesma foi obtida através do método volumétrico. Deste modo, foi possível saber qual a velocidade de escoamento do fluido no momento da medida de perda de carga.

3.3 Medição da perda de carga localizada

A segunda etapa do experimento foi semelhante a etapa 1, porém agora foram medidas as perdas de carga localizadas geradas em cada peça especial. Para isso foi montada uma bancada experimental, mostrada na Figura 12, com a adição das peças especiais. As peças especiais utilizadas no experimento foram: curva de 90°, cotovelos de 45° e 90°, registro de esfera. Os diâmetros estudados em cada peça foram 20, 25 e 32 mm.

Figura 12 – Ilustração da bancada experimental para peças especiais



Fonte: Elaboração própria

A determinação da perda de carga, nas peças especiais, foi semelhante as perdas lineares, também obtida pelo teorema de Bernoulli. No entanto houve uma diferença de nível entre o início e final da peça. Assim a perda de carga, nas diferentes peças especiais, foi obtida pela seguinte equação:

$$\Delta e = \left(\frac{p_1}{\gamma} - \frac{p_2}{\gamma} \right) + (Z_1 - Z_2) \quad \dots(17)$$

Em que:

$\frac{P1}{\gamma}$ = pressão na tomada de entrada da peça (mca);

$\frac{P2}{\gamma}$ = = pressão na tomada de saída da peça (mca);

(Z1-Z2) = desnível entre as tomadas de pressão (m)

Essa diferença de pressão foi obtida através de um manômetro diferencial de mercúrio. Este foi instalado com uma das tomadas de pressão ligada no início e a outra conectada no final da peça.

3.4 Comparações das perdas de carga

Para os diferentes diâmetros estudados, foi realizada a comparação entre os resultados de perda de carga localizada em cada peça especial, com as perdas geradas pelos comprimentos equivalentes das respectivas peça, propostos pela NBR 5626 (1998) e Schneider Motobombas (2014).

Os resultados foram submetidos a análise da variância e as médias foram comparadas entre si pelo teste *T de student*, a nível de 5% de probabilidade de erro.

Ao final da pesquisa, com os resultados obtidos, foi proposta uma nova tabela de comprimentos equivalentes para as peças analisadas, com um coeficiente de segurança de 15% para cada singularidade.

Com a média dos resultados obtidos experimentalmente para a perda linear da tubulação de 20, 25 e 32 mm, foi realizada uma comparação com os resultados obtidos através da aplicação das fórmulas Universal (equação 18) e de Fair-Whipple-Hsiao (equação 19).

$$hf = 0,0826 f \frac{Q^2}{D^5} L \quad \dots(18)$$

em que:

hf: perda de carga continua (m);

f: fator de atrito (adimensional);

L: comprimento da tubulação (m);

$$J = 0,000859 \frac{Q^{1,75}}{D^{4,75}} \quad \dots(19)$$

Em que:

Q: vazão da tubulação (m³/s);

D: diâmetro da tubulação (m).

Em que o fator de atrito é obtido através da fórmula proposta por Swamee e Jain (equação 20), do mesmo modo que a número de Reynolds é obtido pela fórmula 21 ou 22.

$$f = \frac{1,325}{[\ln(\frac{e}{3,7D} + \frac{5,74}{Re^{0,9}})]^2} \quad \dots(20)$$

Em que:

D: diâmetro da tubulação (m);

e: é a rugosidade absoluta da tubulação (m);

Re: número de Reynolds;

$$Re = \frac{\rho U D_h}{\mu} \quad \dots(21)$$

Ou

$$Re = \frac{U D_h}{\nu} \quad \dots(22)$$

Em que:

U: Velocidade média de escoamento (m/s);

ρ : Massa específica (kg/m³);

μ : Viscosidade dinâmica (kg/m.s);

ν : Viscosidade cinemática (m²/s).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste tópico serão apresentados os resultados oriundos dos experimentos, realizados com as tubulações retilíneas de PVC e as respectivas peças especiais.

Primeiramente, foram ensaiadas as tubulações retilíneas cujos resultados servirão como base para as comparações entre os valores tabelados, de perda de carga localizada, e obtidos experimentalmente. Os valores para as perdas de cargas distribuídas, nas tubulações com diâmetros de 20, 25 e 32 mm, são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Perda de carga distribuída em tubulações retilíneas

Diâmetro nominal - DN (mm)	Perda de carga Tubulação retilínea (mca)
20	0,688
25	0,427
32	0,392

Fonte: Elaboração própria.

Nota-se através dos resultados, apresentados na tabela 4, que a tubulação de menor diâmetro, 20 mm, apresentou uma maior perda de carga em comparação com as outras, da mesma forma que a tubulação de 32 mm apresentou uma menor perda de carga. Isso nos mostra que quanto menor o diâmetro da tubulação, maior será a perda de carga da mesma e vice versa. Isso ocorre devido a tubulação de menor diâmetro apresentar uma menor área, conseqüentemente uma maior velocidade, fazendo com que o fluido, de água em seu interior, apresente uma maior turbulência em seu deslocamento, existindo, portanto, uma maior perda de energia. Estes resultados corroboram com Azevedo Netto (1998); Porto (2004) que ressaltam que a perda de carga em tubulações retilíneas é inversamente proporcional aos diâmetros internos das mesmas.

Na literatura existe um grande número de fórmulas, que a partir de algumas variáveis, estimam as perdas de carga distribuídas, e ambas correlacionam o diâmetro da tubulação como sendo inversamente proporcional a perda de carga (Porto, 2004).

Após a etapa de determinação da perda de carga distribuída, partiu-se para os experimentos em que foram ensaiadas as peças especiais, para que fossem obtidas as perdas de cargas localizadas geradas por cada singularidade, e posteriormente, serem comparadas com as perdas de cargas geradas por seus comprimentos equivalentes propostos pela NBR 5626 (1998) e Schneider Motobombas (2014), como é mostrado na Tabela 5.

Os dados de perda de carga localizada obtidos experimentalmente, em cada peça especial, apresentados na Tabela 5, são valores médios de dez repetições. Os valores de perda de carga tabelados, para as peças: cotovelo de 45°; cotovelo de 90° e curva de 90° foram obtidos através da tabela de comprimentos equivalentes apresentados na NBR 5626 (1998). Já a perda de carga para o registro de esfera, foi obtida pelo comprimento equivalente indicado por Schneider Motobombas (2014), uma vez que não é apresentado um valor para a respectiva peça na tabela da NBR 5626.

Tabela 5 – Valores médios, de dez repetições, para perda de carga localizada obtidas experimentalmente e estimadas por seus respectivos comprimentos equivalentes

Peça especial	Diâmetro (mm)	Perda de carga (mca)	
		Experimental	Tabelado
Cotovelo de 45°	20	0,197 b*	0,344 a*
	25	0,200 b	0,299 a
	32	0,296 b	0,392 a
Cotovelo de 90°	20	0,240 b	0,826 a
	25	0,263 b	0,641 a
	32	0,278 b	0,784 a
Curva de 90°	20	0,166 b	0,344 a
	25	0,155 b	0,256 a
	32	0,280 a	0,274 a
Registro de esfera	20	0,629 a	0,138 b
	25	0,653 a	0,128 b
	32	0,639 a	0,157 b

Fonte: Elaboração própria.

*Valores seguidos pela mesma letra na linha, não diferem estatisticamente pelo teste de student a 5% de probabilidade de erro.

Nota-se, na Tabela 5, para os diferentes diâmetros, que o cotovelo de 45°, cotovelo de 90° e a curva de 90° apresentaram valores de perda de carga, medidas experimentalmente, inferiores e com diferença estatística, das obtidas pela tabela de comprimentos equivalentes. Exceção feita apenas para a curva de 90° no diâmetro de 32mm, onde a perda de carga medida foi superior a gerada pelo seu comprimento equivalente, no entanto este resultado não apresenta diferença estatística significativa.

Entretanto, essa diferença significativa observada, entre os valores de perda de carga localizada obtida no experimento com as estimadas pelos comprimentos equivalentes, não chega a comprometer os projetos hidráulicos, na construção civil, uma vez que os valores, teóricos, utilizados para determinação destas perdas são superiores aos gerados na prática pelas mesmas. Assim, ocorre uma superestimativa das perdas de carga nos projetos hidráulicos.

Todavia, os resultados para os diferentes diâmetros do registro de esfera, observados na Tabela 5, mostram dados preocupantes já que os valores experimentais são bem maiores (em média 77,96%), apresentando diferença estatisticamente significativa, dos encontrados pela tabela de seu comprimento equivalente. Ou seja, ao usar os valores teóricos, para estimativa da perda de carga localizada, no dimensionamento de uma instalação hidráulica, está-se cometendo um erro grave, pois utiliza-se valores menores aos que são gerados por essa singularidade, assim subestimando as perdas geradas por essas peças.

Na Tabela 6, são apresentados para os diversos diâmetros estudados os valores de perda de carga em tubulação retilínea de 1m, o comprimento equivalente (L_{eq}) tabelado para as diferentes peças especiais e diâmetros, os comprimentos equivalente obtidos experimentalmente, e os novos valores de comprimento equivalente propostos, os quais são os valores da coluna L_{eq} experimental acrescidos de uma margem de segurança de 15%.

Tabela 6 - Perda de carga linear em 1m de tubulação, comprimentos equivalentes tabelados, para as respectivas peças e diâmetros e novos comprimentos equivalentes propostos

Diâmetro (mm)	Δe em 1m linear (mca)	Peça especial	Leq Experimental (mca)	Leq Tabelado (mca)	Leq Proposto (mca)
20	0,688	Cotovelo de 45°	0,29	0,50	0,33
		Cotovelo de 90°	0,35	1,20	0,40
		Curva de 90°	0,24	0,50	0,28
		Registro de esfera	0,92	0,20	1,06
25	0,427	Cotovelo de 45°	0,47	0,70	0,54
		Cotovelo de 90°	0,63	1,50	0,72
		Curva de 90°	0,37	0,60	0,42
		Registro de esfera	1,56	0,30	1,79
32	0,392	Cotovelo de 45°	0,77	1,00	0,89
		Cotovelo de 90°	0,72	2,00	0,83
		Curva de 90°	0,74	0,70	0,85
		Registro de esfera	1,67	0,40	1,92

Fonte: Elaboração própria.

Δe = perda de carga.

Através da Tabela 6, nota-se que os novos valores de Leq propostos, para o cotovelo de 45°, cotovelo de 90° e a curva de 90°, para os diferentes diâmetros testados, são inferiores os tabelados pela NBR 5626 (1998). Exceção feita para a curva de 90° no diâmetro de 32 mm, onde o Leq proposto é superior ao tabelado, proposto na literatura.

Para o registro de esfera, os novos valores de Leq propostos, são superiores aos apresentados por Schneider Motobombas (2014), ou seja, essa peça gera maior perda de carga do que seu comprimento equivalente tabelado.

Na Tabela 7, fez-se a comparação dos resultados experimentais de perda de carga distribuída com os valores obtidos pela fórmula Universal e pela equação de Fair-Whipple-Hsiao.

Tabela 7 - Valores experimentais e teóricos, obtidos pelas fórmulas Universal e de Fair-Whipple-Hsiao, para a perda de carga distribuída, nos diferentes diâmetros estudados

Diâmetro (mm)	Vazão (m ³ /s)	Fator de atrito	N° Reynolds	Perda de Carga		
				Experimento	Universal	Fair-Whipple-Hsiao
20	0,0012	0,02037	72571,2	0,6881	0,7420	0,7674
25	0,0012	0,02128	54444,5	0,4273	0,2540	0,2659
32	0,0012	0,02122	52926,1	0,3920	0,0737	0,0823

Fonte: Elaboração própria.

Nota-se, através da Tabela 7, que os valores estimados de perda de carga distribuída, para a tubulação de 20 mm, através das fórmulas Universal e de Fair-Whipple-Hsiao foram 7,27% e 10,33%, superiores aos medidos na bancada experimental, respectivamente. Assim, como ambas as fórmulas teóricas, apresentaram valores de perda de carga distribuída superiores à observada, os projetos hidráulicos, não correm riscos de subdimensionamento, o que poderiam causar danos quanto a pressão e vazão desse tipo de instalação.

Já, para a tubulação de 25 mm o valor de perda de carga linear, medido no experimento foi superior às fórmulas teóricas empregadas, com valor 40,55% superior à fórmula Universal e 37,77% maior para a fórmula de Fair-Whipple-Hsiao. Para a tubulação de 32 mm, nota-se característica semelhante a tubulação de 25 mm, no entanto o valor de perda de carga medido foi 81,19% e 79,00% superior aos calculados pelas fórmulas Universal e de Fair-Whipple-Hsiao, respectivamente.

Deste modo, para as tubulações de maiores diâmetros, 25 e 32 mm, observou-se que os valores de perda de carga calculados pelas fórmulas teóricas, são inferiores as experimentais, ou seja, nos projetos hidráulicos está se subestimando as perdas de cargas geradas por essas tubulações, o que conseqüentemente acarretará em erros graves de dimensionamento, como ausência de pressão suficiente para se ter uma vazão adequada nos pontos de água.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

De acordo com a metodologia utilizada e nas condições em que o trabalho foi realizado pode-se concluir:

Os valores adotados como comprimentos equivalentes, apresentados pela literatura, para a perda de carga localizada, em cotovelo de 45° e 90° (nos diâmetros de 20, 25 e 32 mm) e curva de 90° (nos diâmetros de 20 e 25 mm), estão de acordo, pois são maiores que os obtidos experimentalmente, sendo assim possuem uma margem de segurança, ou seja, os projetos hidráulicos estão sendo superdimensionadas, e não subdimensionados. Para a curva de 90°, no diâmetro de 32 mm, o comprimento equivalente subdimensiona os projetos hidráulicos, uma vez que a perda de carga gerada é inferior a medida, embora não há diferença significativa entre as mesmas.

O comprimento equivalente, para o registro de esfera deve ser revisto, uma vez que as perdas de carga observadas no mesmo são superiores as geradas pelo seu comprimento equivalente tabelado. Portanto, nos dimensionamentos hidráulicos está-se subestimando os mesmos, não utilizando valores que expressem realmente a perda de carga causada por essas singularidades, acarretando em erros nos projetos de instalações hidráulicas, podendo assim comprometer a eficiência das mesmas, visto que essas peças são utilizadas frequentemente.

Quanto a perda de carga distribuída, os resultados alcançados através das fórmulas Universal e de Fair-Whipple-Hsiao apresentaram diferença expressiva quando comparados com os valores experimentais. Para a tubulação de 20 mm, os valores teóricos foram maiores que os práticos, ao contrário da tubulação de 25 e 32 mm, em que apresentaram valores experimentais superiores aos obtidos através das fórmulas.

Ao final deste trabalho, sugere-se para trabalhos futuros o estudo da perda de carga em outras singularidades, como:

- Tê de passagem direta;
- Tê de saída lateral;
- Tê de saída bilateral;
- Luva de redução;
- Hidrômetro;

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5626**: instalação predial de água fria. Rio de Janeiro, 1998.

AZEVEDO NETTO, J. M. **Manual de hidráulica**. 8. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1998.

BACK, A. J. **Hidráulica e hidrometria aplicada**. Florianópolis :Epagri, 2006,299p.

BAETA, J. P. L. **Avaliação da prática actual de dimensionamento de redes domiciliárias de distribuição de água**: Análise comportamental e ensaios in situ. 2007. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2007.

BAPTISTA, M. B. **Fundamentos de engenharia hidráulica**. 3 ed. Ver. E ampl. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2010.

BARRÊTO JUNIOR, M. **Otimização de um sistema de distribuição predial de água fria**: Estudo de caso. 2006. 97 f. Dissertação (Pós – Graduação em Engenharia Sanitária) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2006.

CANTERI, M. G., ALTHAUS, R. A., VIRGENS FILHO, J. S., GIGLIOTI, E. A., GODOY, C. V. **SASM - Agri: Sistema para análise e separação de médias em experimentos agrícolas pelos métodos Scoft - Knott, Tukey e Duncan**. Revista Brasileira de Agrocomputação, V.1, N.2, p.18-24. 2001.

EVANGELISTA, A. W. P. **Condução de água**: Conduitos forçados. Goiânia: UFG, 2011?. Disponível em: <http://portais.ufg.br/uploads/68/original_3.2__Conduitos_For_ados.pdf>. Acesso em: 31 de agosto 2013.

MARCOLIN, E.; ROBAINA, A. D. Consumo de energia e eficiênciadas estações de bombeamento de lavouras de arroz irrigado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.32, n.2, p.229-235, 2002. <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33132208>>. Acesso em: 26 de agosto 2013.

MAUREN ELL, S.; TRABACHINI, A. Perda de carga em conduitos forçados. **Revista Científica da Faculdade de Tecnologia de Tatuí**, Tatuí, v.1, n.1, jul./dez. 2009. Disponível em: <

http://www.revistasapere.inf.br/download/perda_de_carga_tubulacao_singularidades.pdf >. Acesso em: 24 de agosto 2013.

NEVES, E. T. **Curso de hidráulica**. 6. ed. Porto Alegre: Globo, 1979.

PORDEUS, R. V. **Regime de escoamento**. Mossoró: UFERSA, 2009?. Disponível em:
<<http://www2.ufersa.edu.br/porta1/view/uploads/setores/111/CAP%20V%20TIPOS%20E%20REGIME%20DE%20ESCOAMENTO.pdf>>. Acesso em: 03 de agosto 2013.

PORTO, R. M. **Hidráulica básica**. 3. Ed. São Carlos: EESC-USP, 2004.

RESENDE, M. F. **A variação das características hidráulicas em condutos forçados devido à infestação pelo *Limnoperna fortunei***. 2007. 101 f. Dissertação (Pós – Graduação em Saneamento, meio ambiente e recursos hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

SAMPAIO, S. C. et al. Equação de Hazen-Williams corrigida para água residuária proveniente da suinocultura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 1, p. 5-10, 2007. . Disponível em:
<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662007000100001>. Acesso em: 26 de agosto 2013.

SCHNEIDER Motobombas. **Tabela 7 – Perda de carga em acessórios**. Manual técnico. Disponível em:
<http://www.escoladavida.eng.br/mecflubasica/Perdas_de_carga_em_acessorios.pdf>. Acesso em: 19 de fevereiro 2014.

SOUZA, A. P. **Dimensionamento do sistema hidráulico para uma desensiladeira**. 2012. 49 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Horizontina, Horizontina, 2012.

TORRES, R. R. **Avaliação de diferentes fórmulas de perda de carga linear em tubos**. 2011. 35 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

VERTCHENKO, L.; DICKMANA, G.; FERREIRA, J. R. F. Transferência de fluido por meio de um sifão vs. aplicação da equação de Bernoulli. **Rev. Bras. Ensino Física**, São Paulo, v. 31, n. 3, p. 1-7, out. 2009. Disponível em:
<<http://www.academicoo.com/artigo/transferencia-de-fluido-por-meio-de-um-sifao-vs-aplicacao-da-equacao-de-bernoulli>>. Acesso em: 03 de agosto 2013.

VILAÇA, F. N. **Perda de carga em conectores iniciais da irrigação localizada.** 2012. 65 f. Dissertação (Mestrado em Ciências. Área de concentração: Irrigação e Drenagem) – Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz Queiroz”, Piracicaba, 2012.

ZITTERELL, D. B. **Perda localizada de carga em conectores utilizados em microirrigação.** 2011. 65 f. Dissertação (Mestrado em Ciências. Área de concentração: Irrigação e Drenagem) – Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura “Luiz Queiroz”, Piracicaba, 2011.